

Terbit online pada laman : <http://teknosi.fti.unand.ac.id/>

Jurnal Nasional Teknologi dan Sistem Informasi

| ISSN (Print) 2460-3465 | ISSN (Online) 2476-8812 |



Artikel Penelitian

Pemetaan Kualitas Udara Menggunakan Integrasi *K-Means* dan *Random Forest* Berbasis Data Sentinel-5P

Muhammad Ridwan^{a,*}, Fenty Kurnia Oktorina^a, Hanifah Khairiah^b, Fajril Akbar^c

^a Teknik Informatika, Politeknik Kampar, Jl. Tengku Muhammad KM2, Bangkinang, Indonesia

^b Teknik Pengolahan Sawit, Politeknik Kampar, Jl. Tengku Muhammad KM2, Bangkinang, Indonesia

^c Departemen Sistem Informasi, Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 08 Juli 2026

Revisi Akhir: 13 Agustus 2026

Diterbitkan Online: 23 Agustus 2026

KATA KUNCI

Sentinel-5P,
K-Means,
Random Forest,
Kualitas Udara,
Google Earth Engine

KORESPONDENSI

E-mail: ridwanpolkam@gmail.com

ABSTRACT

Kualitas udara merupakan salah satu indikator penting dalam pengelolaan lingkungan, namun ketersediaan data hasil pengukuran lapangan masih terbatas pada banyak wilayah, termasuk Kabupaten Kampar. Penelitian ini bertujuan menganalisis sebaran spasial polutan atmosfer, memetakan kualitas udara menggunakan integrasi metode *K-Means* dan *Random Forest*, serta mengidentifikasi kontribusi masing-masing parameter polutan terhadap pembentukan kelas kualitas udara. Penelitian memanfaatkan data Sentinel-5P Level-3 periode Januari–Desember 2025 yang diolah melalui Google Earth Engine (GEE). Lima parameter atmosfer yang digunakan meliputi nitrogen dioksida (NO₂), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), ozon (O₃), dan Aerosol Index (AI). Metode *K-Means* digunakan untuk membentuk pseudo-label melalui proses *clustering*, kemudian hasilnya digunakan sebagai data pelatihan pada algoritma *Random Forest* untuk menghasilkan peta kualitas udara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas udara di Kabupaten Kampar terbagi ke dalam tiga kelas, yaitu kelas rendah sebesar 45%, kelas sedang 44%, dan kelas tinggi 11%. Wilayah dengan kualitas udara tinggi terkonsentrasi di bagian selatan Kabupaten Kampar, terutama Kecamatan Kampar Kiri Hulu dan sekitarnya. Analisis *feature importance* menunjukkan bahwa CO dan Aerosol Index merupakan parameter yang memberikan kontribusi terbesar terhadap pembentukan kelas kualitas udara, diikuti oleh O₃, NO₂, dan SO₂. Selain itu, distribusi spasial kelas kualitas udara tinggi menunjukkan kesesuaian dengan beberapa lokasi kejadian kebakaran hutan dan lahan pada tahun 2025. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi *K-Means* dan *Random Forest* berbasis data Sentinel-5P berpotensi menjadi alternatif pemetaan kualitas udara pada wilayah yang memiliki keterbatasan stasiun.

1. PENDAHULUAN

Kualitas udara merupakan salah satu indikator penting dalam menentukan kondisi lingkungan dan kesehatan masyarakat [1], [2], [3], [4]. Peningkatan konsentrasi polutan atmosfer diketahui berkaitan dengan berbagai gangguan kesehatan, mulai dari infeksi saluran pernapasan hingga penyakit kardiovaskular [5], [6]. Oleh karena itu, informasi kualitas udara yang akurat dan berkelanjutan diperlukan sebagai dasar dalam penyusunan kebijakan pengendalian pencemaran udara berbasis bukti.

Pemantauan kualitas udara secara umum dilakukan menggunakan stasiun pemantau berbasis darat (*ground-based air monitoring station*) [7], [8], [9]. Meskipun memiliki tingkat akurasi yang tinggi, keterbatasan jumlah stasiun pengamatan menyebabkan cakupan spasial menjadi kurang representatif, terutama pada wilayah yang belum memiliki infrastruktur pemantauan memadai [10], [11]. Data kualitas udara lokal belum mampu menggambarkan kondisi atmosfer secara menyeluruh baik secara spasial maupun temporal [12], [13]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan alternatif berbasis penginderaan jauh untuk melengkapi informasi kualitas udara secara lebih menyeluruh [14].

Di sisi lain, sejumlah sumber emisi lokal berpotensi meningkatkan konsentrasi polutan di atmosfer antara lain kegiatan transportasi dan peningkatan jumlah kendaraan bermotor, pembukaan lahan dan pembakaran biomassa/karhutla serta aktivitas industri dan pembangkit energi dan semuanya tercatat sebagai kontributor utama polusi udara di berbagai studi regional Indonesia [15]. Keterbatasan informasi ini dapat menyulitkan identifikasi wilayah yang berpotensi mengalami penurunan kualitas udara serta menghambat penyusunan strategi mitigasi yang tepat.

Perkembangan teknologi penginderaan jauh membuka peluang baru dalam pemantauan kualitas udara melalui pemanfaatan data satelit. Sentinel-5P yang dilengkapi instrumen *Tropospheric Monitoring Instrument* (TROPOMI) menyediakan informasi berbagai parameter atmosfer, seperti nitrogen dioksida (NO₂), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), ozon (O₃), dan Aerosol Index dengan cakupan spasial yang luas serta frekuensi pengamatan harian [16]. Produk Sentinel-5P telah dimanfaatkan untuk berbagai kajian kualitas udara, termasuk estimasi konsentrasi NO₂ permukaan dan pemantauan polutan atmosfer pada skala regional [17], [18].

Pemetaan kualitas udara menggunakan citra Sentinel-5P dan algoritma *Random Forest* merupakan pendekatan yang menjanjikan untuk mengestimasi sebaran polutan udara pada wilayah yang minim stasiun pemantauan, karena data satelit menyediakan cakupan spasial yang luas dan kontinu [19], [20]. Dalam studi di Jabodetabek, konsentrasi PM_{2.5} diestimasi dari data stasiun WAQI dan citra Sentinel-5P TROPOMI menggunakan regresi *Random Forest*, kemudian dianalisis bersama pola transport polutan berbasis HYSPLIT untuk melihat pengaruh angin muson terhadap distribusi spasialnya [19]. Temuan ini menunjukkan bahwa pemanfaatan Sentinel-5P dengan *Random Forest* berpotensi besar untuk pemetaan kualitas udara, tetapi tetap memerlukan validasi lapangan dan variabel pendukung tambahan karena akurasi estimasi dapat berbeda antar-parameter polutan.

Beberapa Penelitian mengembangkan indeks kualitas udara global berbasis data penginderaan jauh dan stasiun pemantau menggunakan pendekatan *machine learning* [7] dan model klasifikasi kualitas udara menggunakan data ISPU DKI Jakarta dengan menerapkan metode *Random Forest* dan *Support Vector Machine* yang dikombinasikan dengan teknik *oversampling* SMOTE [21]. Namun analisis parameter polutan dilakukan secara terpisah atau memerlukan dukungan data pengamatan lapangan yang tidak selalu tersedia pada wilayah minim sensor. Penelitian lainnya juga memanfaatkan Earth Engine dan algoritma *machine learning* untuk prediksi kualitas udara di Jakarta menggunakan XGBoost [22]. Namun, penelitian tersebut berfokus pada prediksi indeks kualitas udara, sedangkan integrasi *K-Means* dan *Random Forest* untuk menghasilkan pemetaan kualitas udara berbasis Sentinel-5P masih belum banyak dilakukan.

Metode *K-Means* merupakan salah satu algoritma *unsupervised learning* yang banyak digunakan untuk mengelompokkan data (*clustering*) berdasarkan karakteristik kemiripan [23]. Sementara itu, *Random Forest* merupakan algoritma klasifikasi yang memiliki kemampuan prediksi yang baik serta mampu

mengidentifikasi kontribusi masing-masing variabel melalui analisis *feature importance* [24]. Integrasi kedua pendekatan tersebut berpotensi menghasilkan pemetaan kualitas udara yang lebih komprehensif, terutama pada wilayah dengan keterbatasan data kualitas udara berbasis pengukuran lapangan.

Integrasi metode *unsupervised learning* dan *supervised learning* mulai banyak dikembangkan pada berbagai bidang klasifikasi citra karena mampu mengatasi keterbatasan data berlabel. Dalam pendekatan tersebut, algoritma clustering digunakan untuk membentuk kelompok awal berdasarkan karakteristik data, kemudian hasil clustering dimanfaatkan sebagai *pseudo-label* pada proses klasifikasi sehingga model mampu menghasilkan pemetaan yang lebih terstruktur. Pendekatan ini sangat sesuai diterapkan pada data penginderaan jauh yang umumnya memiliki cakupan spasial luas namun terbatas dalam penyediaan data referensi lapangan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis sebaran spasial polutan udara berdasarkan data Sentinel-5P di Kabupaten Kampar tahun 2025; (2) memetakan kualitas udara menggunakan integrasi metode *K-Means* dan *Random Forest*; serta (3) menganalisis kontribusi masing-masing parameter polutan terhadap pembentukan kelas kualitas udara. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi alternatif pendekatan pemantauan kualitas udara berbasis data satelit pada wilayah minim sensor serta mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan lingkungan secara lebih efektif.

2. METODE

2.1. Lokasi Penelitian

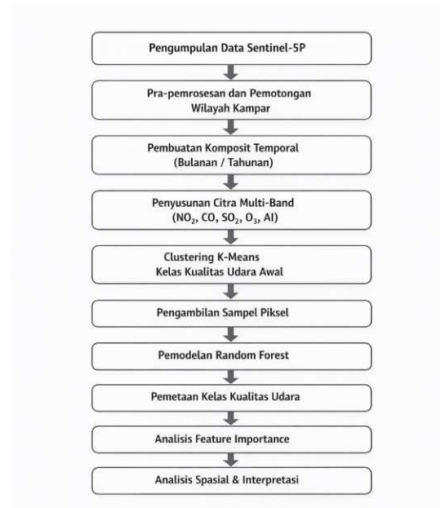
Penelitian dilakukan di Kabupaten Kampar, Provinsi Riau, Indonesia. Kabupaten Kampar memiliki luas wilayah sekitar 11.289,28 km² dan terdiri atas 21 kecamatan. Wilayah ini dipilih karena memiliki karakteristik penggunaan lahan yang beragam, meliputi kawasan hutan, perkebunan, permukiman, serta aktivitas transportasi yang berpotensi memengaruhi kualitas udara. Selain itu, kejadian kebakaran hutan dan lahan (karhutla) yang terjadi di beberapa wilayah Kabupaten Kampar pada tahun 2025 diduga turut berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi polutan di atmosfer. Alur penelitian ini dapat dilihat pada gambar 1.

Pada penelitian ini, metode *K-Means* tidak digunakan sebagai hasil akhir pemetaan kualitas udara, tetapi berfungsi untuk membentuk kelas awal (*pseudo-label*) berdasarkan karakteristik lima parameter polutan. Selanjutnya kelas tersebut digunakan sebagai data pelatihan (*training label*) pada algoritma *Random Forest* sehingga proses klasifikasi dapat dilakukan tanpa memerlukan data kualitas udara hasil pengukuran lapangan.

2.2. Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data Sentinel-5P Level-3 yang diperoleh melalui platform *Google Earth Engine* (GEE) [25]. Lima parameter polutan atmosfer digunakan sebagai variabel pemetaan, yaitu nitrogen dioksida (NO₂), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), ozon (O₃), dan Aerosol Index (AI). Seluruh data diolah untuk periode Januari–Desember 2025

dengan wilayah kajian dibatasi pada batas administrasi Kabupaten Kampar.



Gambar 1. Alur Proses Penelitian

Tabel 1. Data Sentinel-5P yang digunakan dalam penelitian

No	Parameter	Produk Sentinel-5P (GEE)	Band	Satuan
1	Nitrogen Dioksida (NO ₂)	COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2 2	tropospheric_N O2_column_number_density	mol/m ²
2	Carbon Monoxide (CO)	COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CO 2	CO_column_number_density	mol/m ²
3	Sulfur Dioxide (SO ₂)	COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2 2	SO2_column_number_density	mol/m ²
4	Ozon (O ₃)	COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_O3 2	O3_column_number_density	mol/m ²
5	Aerosol Index (AI)	COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_AE R_AI	absorbing_aerosol_index	(indeks)

Source: Google Earth Engine Data Catalog (COPERNICUS/S5P)

2.3. Pra-pemrosesan Data Sentinel-5P

Tahapan pra-pemrosesan meliputi pengambilan data Sentinel-5P pada periode Januari–Desember 2025. Data Sentinel-5P TROPOMI diproses menggunakan *Google Earth Engine* (GEE). Pemilihan band yang sesuai dengan parameter polutan dan penyusunan komposit tahunan menggunakan nilai rata-rata, serta pemotongan (*clip*) berdasarkan batas administrasi Kabupaten Kampar. Selanjutnya, kelima parameter digabungkan menjadi citra multi-band (*multi-band image stack*) yang digunakan sebagai masukan pada proses clustering dan klasifikasi.

2.4. Pembentukan Pseudo-label Menggunakan K-Means

Metode *K-Means* digunakan untuk membentuk kelas awal kualitas udara berdasarkan kemiripan karakteristik lima parameter polutan. Sebanyak 5.000 sampel piksel dipilih secara acak dari citra multi-band dengan resolusi spasial 1 km. Selanjutnya, algoritma *K-Means* diterapkan dengan jumlah cluster (*k*) sebanyak tiga untuk menghasilkan kelompok kualitas udara awal. Hasil clustering tersebut digunakan sebagai pseudo-label pada proses klasifikasi menggunakan *Random Forest*.

2.5. Klasifikasi Menggunakan Random Forest

Random Forest digunakan untuk menghasilkan peta kualitas udara berdasarkan pseudo-label yang diperoleh dari proses *K-Means*. Algoritma *Random Forest* dibangun menggunakan 100 pohon keputusan dengan variabel masukan berupa NO₂, CO, SO₂, O₃, dan *Aerosol Index*. Model yang terbentuk kemudian diterapkan pada seluruh wilayah penelitian untuk menghasilkan peta kualitas udara yang terdiri atas tiga kelas, yaitu rendah, sedang, dan tinggi.

2.6. Analisis Kontribusi Variabel

Analisis kontribusi variabel dilakukan menggunakan fitur *feature importance* yang tersedia pada algoritma *Random Forest*. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi parameter polutan yang memiliki pengaruh terbesar terhadap pembentukan kelas kualitas udara. Nilai *feature importance* yang lebih tinggi menunjukkan bahwa variabel tersebut memiliki kontribusi yang lebih besar dalam proses klasifikasi.

3. HASIL

Data Sentinel-5P TROPOMI untuk parameter NO₂, CO, SO₂, O₃, dan Aerosol Index (AI) diproses menggunakan *Google Earth Engine* (GEE). Tahapan pra-pemrosesan meliputi pemilihan periode pengamatan Januari–Desember 2025, pemotongan wilayah studi Kabupaten Kampar, pemilihan band parameter sesuai masing-masing produk, serta pembuatan komposit temporal.

Untuk setiap parameter polutan, citra harian difilter berdasarkan rentang waktu pengamatan dan kemudian dikompositkan menggunakan nilai rata-rata (*mean*) bulanan. Khusus untuk parameter NO₂, dilakukan pemaskaan awan menggunakan band *cloud_fraction* dengan ambang batas < 0,3 untuk meminimalkan pengaruh awan terhadap kualitas data. Parameter CO, SO₂, O₃, dan Aerosol Index tidak menggunakan pemaskaan awan karena pada produk Level-3 parameter tersebut tidak menyediakan band *cloud_fraction* secara langsung.

Seluruh hasil komposit bulanan kemudian dipotong (*clip*) menggunakan batas administrasi Kabupaten Kampar sehingga hanya piksel yang berada di dalam wilayah penelitian yang dipertahankan. Data yang dihasilkan pada tahap ini berupa peta sebaran spasial masing-masing parameter polutan dalam satuan kepadatan kolom atmosfer (mol/m^2) untuk NO_2 , CO, SO_2 , dan O_3 , serta nilai indeks untuk Aerosol Index.

Selanjutnya, untuk kebutuhan analisis lanjutan, dilakukan pula penyusunan peta rata-rata tahunan tahun 2025 untuk setiap parameter polutan dengan menggabungkan seluruh citra bulanan. Hasil peta tahunan ini digunakan sebagai dasar pembentukan citra multi-band pada tahap berikutnya. Nilai negatif yang muncul pada beberapa piksel, khususnya pada parameter gas, dipertahankan pada tahap pra-pemrosesan karena merupakan proses inversi spektral pada produk satelit. Nilai tersebut menandakan konsentrasi yang sangat rendah mendekati nol. Penanganan nilai negatif hanya dilakukan pada tahap visualisasi untuk menghindari bias interpretasi warna pada peta.

3.1. Sebaran Polutan Udara Sentinel-5P

Parameter yang dianalisis meliputi NO_2 , CO, SO_2 , O_3 , dan *Aerosol Index* (AI). Sebaran spasial ditampilkan menggunakan peta rata-rata tahunan tahun 2025 hasil komposit citra Sentinel-5P. Visualisasi menggunakan skema warna bergradasi dari nilai rendah ke tinggi untuk menekankan variasi relatif antar wilayah di Kabupaten Kampar. Tabel 2 menyajikan satuan dan rentang visualisasi yang digunakan untuk menampilkan peta sebaran masing-masing parameter polutan udara, yaitu NO_2 , CO, SO_2 , O_3 ,

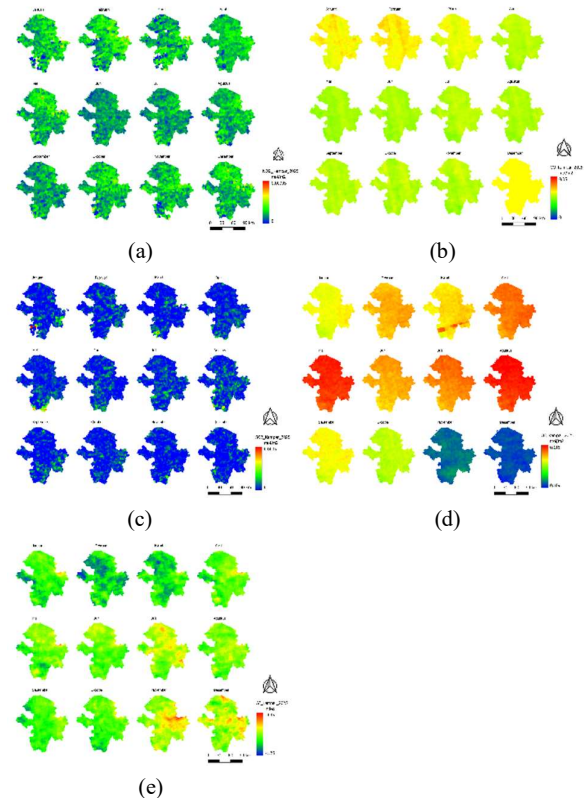
Tabel 2. Satuan dan Rentang Visualisasi Peta

Parameter	Satuan	Rentang visual yang umum
NO_2 (<i>tropospheric column</i>)	mol/m^2	$0 \rightarrow 0.00005$
CO (<i>column</i>)	mol/m^2	$0 \rightarrow 0.05$
SO_2 (<i>column</i>)	mol/m^2	$0 \rightarrow 0.0005$
O_3 (<i>column</i>)	mol/m^2	$0.109 \rightarrow 0.118$
AI (<i>Aerosol Indeks</i>)	indeks	$-1.25 \rightarrow -0.35$

Gambar 2 menunjukkan distribusi spasial rata-rata tahunan lima parameter polutan atmosfer yang diperoleh dari data Sentinel-5P tahun 2025, yaitu NO_2 , CO, SO_2 , O_3 , dan Aerosol Index. Secara umum, masing-masing parameter menunjukkan pola distribusi yang berbeda sesuai dengan karakteristik sumber emisi dan proses atmosfer yang memengaruhinya.

NO_2 di Kabupaten Kampar relatif homogen dengan variasi spasial yang tidak terlalu kontras. Sebaran NO_2 cenderung lebih tinggi pada beberapa wilayah yang memiliki aktivitas transportasi, industri dan permukiman yang relatif padat. Parameter CO menunjukkan distribusi yang lebih luas dibandingkan NO_2 , yang mengindikasikan adanya pengaruh aktivitas pembakaran biomassa dan sumber emisi lainnya. Sementara itu, SO_2 memiliki variasi spasial yang relatif lebih rendah dibandingkan parameter

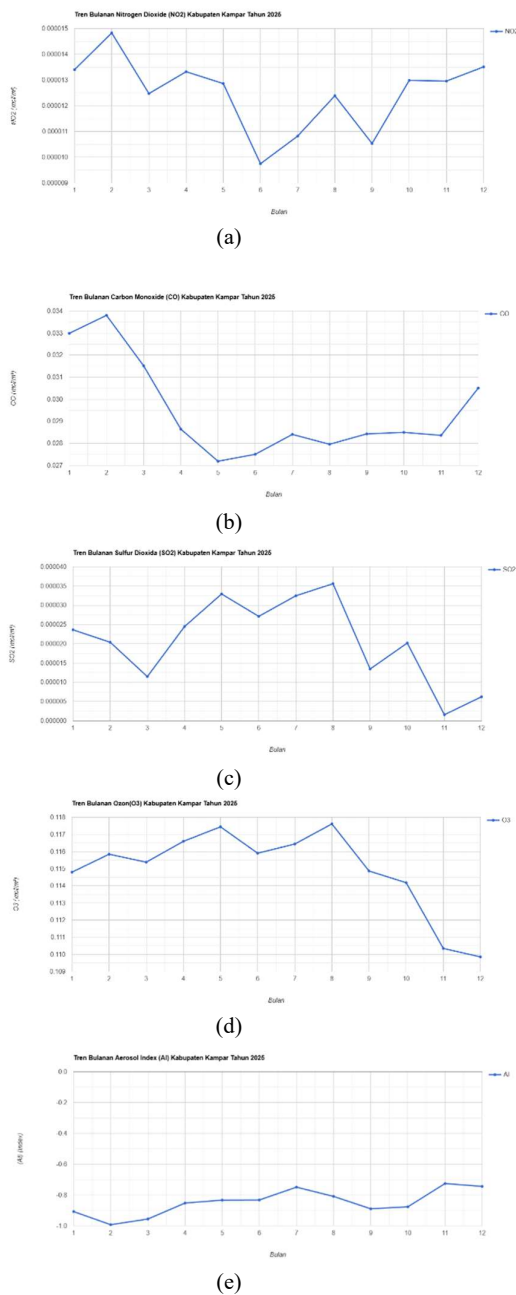
lainnya, menunjukkan bahwa sumber emisi sulfur tidak dominan pada wilayah penelitian.



Gambar 2. Peta Sebaran Jan-Des 2025 Kab. Kampar : (a) NO_2 ; (b)CO; (c) SO_2 ; (d) O_3 ; (e)Aerosol Indeks

Sebaran O_3 relatif lebih merata di seluruh wilayah Kabupaten Kampar. Kondisi ini berbeda dengan NO_2 dan CO karena O_3 merupakan polutan sekunder yang terbentuk melalui reaksi fotokimia di atmosfer. Nilai Aerosol Index umumnya berada pada rentang negatif hingga mendekati nol, yang menunjukkan dominasi aerosol non-absorbing pada sebagian besar wilayah penelitian. Namun demikian, beberapa area menunjukkan nilai yang relatif lebih tinggi yang mengindikasikan peningkatan keberadaan partikel aerosol di atmosfer.

Gambar 3 menunjukkan tren bulanan rata-rata parameter NO_2 , CO, SO_2 , O_3 , dan Aerosol Index (AI) di Kabupaten Kampar selama tahun 2025. Secara umum, seluruh parameter menunjukkan fluktuasi musiman dengan pola yang berbeda-beda. Parameter NO_2 dan CO mencapai nilai tertinggi pada bulan Februari, kemudian mengalami penurunan hingga pertengahan tahun sebelum kembali meningkat secara bertahap menjelang akhir tahun. Sebaliknya, SO_2 dan O_3 menunjukkan peningkatan bertahap dari awal tahun dan mencapai puncaknya pada bulan Agustus sebelum mengalami penurunan pada periode September–Desember.



Gambar 3. Tren bulanan Jan-Des 2025 Kab. Kampar Polutan : (a)NO₂; (b)CO; (c)SO₂; (d)O₃; (e)Aerosol Index

Aerosol Index menunjukkan nilai negatif sepanjang tahun dengan peningkatan nilai (semakin mendekati nol) pada periode Juli serta November–Desember. Pola tersebut mengindikasikan adanya variasi musiman kondisi atmosfer dan keberadaan aerosol di wilayah penelitian. Meskipun terjadi fluktuasi antar bulan, seluruh parameter berada pada rentang yang relatif stabil tanpa menunjukkan lonjakan ekstrem selama periode pengamatan tahun 2025

3.2. Hasil Clustering K-Means

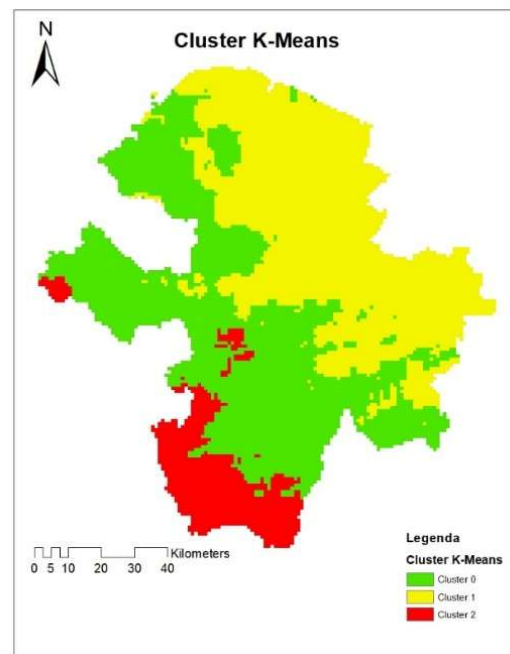
Penerapan algoritma *K-Means* terhadap lima parameter polutan atmosfer, yaitu NO₂, CO, SO₂, O₃, dan Aerosol Index

menghasilkan tiga kelompok (cluster) yang merepresentasikan karakteristik kualitas udara yang berbeda di Kabupaten Kampar tahun 2025. Luas masing-masing cluster disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Klasifikasi Cluster *K-Means*

Cluster	Warna	Luas (ha)	Persentase (%)
Cluster 0	Hijau	465.693,05	45
Cluster 1	Kuning	455.366,33	44
Cluster 2	Merah	113.508,28	11
Total		1.034.567,66	100

Hasil clustering ditampilkan pada Gambar 4. Berdasarkan hasil *clustering*, Cluster 0 (hijau) memiliki luas terbesar yaitu 465.693,05 ha atau sekitar 45% dari total wilayah penelitian. Cluster ini mendominasi sebagian besar wilayah bagian tengah, barat, dan selatan Kabupaten Kampar. Cluster 1 (kuning) memiliki luas 455.366,33 ha atau sekitar 44% dan tersebar dominan pada wilayah utara, timur, dan sebagian tengah Kabupaten Kampar. Sementara itu, Cluster 2 (merah) merupakan cluster dengan luasan terkecil yaitu 113.508,28 ha atau sekitar 11% dari total wilayah penelitian dan terkonsentrasi pada bagian selatan Kabupaten Kampar serta beberapa area yang tersebar secara lokal.



Gambar 4. Peta Hasil clustering K-Means

Perbedaan distribusi spasial antarcluster menunjukkan adanya variasi karakteristik atmosfer berdasarkan kombinasi kelima parameter polutan yang digunakan. Hasil clustering ini selanjutnya digunakan sebagai pseudo-label pada proses klasifikasi menggunakan algoritma *Random Forest* untuk menghasilkan peta kualitas udara yang lebih terstruktur dan mudah diinterpretasikan.

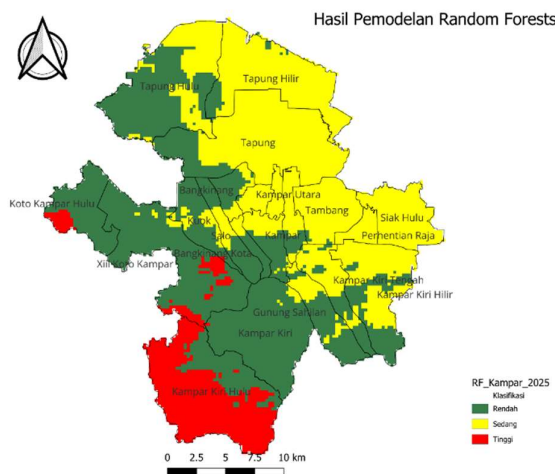
Pembentukan tiga cluster pada penelitian ini tidak merepresentasikan kategori baku Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), melainkan kelompok relatif yang dibentuk berdasarkan

kemiripan karakteristik lima parameter polutan hasil pengamatan Sentinel-5P. Oleh karena itu, masing-masing cluster menggambarkan variasi kualitas udara secara spasial pada wilayah penelitian.

3.3. Hasil Pemetaan Kualitas Udara Menggunakan Random Forest

Pemodelan *Random Forest* dilakukan menggunakan lima parameter polutan atmosfer, yaitu NO_2 , CO , SO_2 , O_3 , dan Aerosol Index yang disusun dalam citra multi-band tahunan 2025. Model dibangun menggunakan 100 pohon keputusan (*trees*) dan menghasilkan klasifikasi kualitas udara ke dalam tiga kelas, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Hasil klasifikasi ditampilkan pada Gambar 5.

Berdasarkan hasil klasifikasi *Random Forest*, sebaran kualitas udara di Kabupaten Kampar menunjukkan pola spasial yang cukup kontras antar wilayah. Wilayah dengan pencemaran udara rendah (relatif lebih baik) yang ditunjukkan warna hijau terkonsentrasi pada Tapung Hulu, Bangkinang, Kampar, Gunung Sahilan dan Sebagian besar Kampar Kiri. Pada Wilayah ini didominasi oleh area dengan tutupan vegetasi lebih luas dan aktivitas antropogenik relatif lebih rendah dibandingkan wilayah utara dan timur. Luas wilayah dengan pencemaran rendah adalah sekitar 465.693,05 hektar (45 %).



Gambar 5. Hasil Pemodelan *Random Forest*

Kelas sedang (warna kuning) mendominasi wilayah bagian Tapung, Tapung Hilir, Tambang, Kampar Utara, Siak Hulu, Perhentian Raja dan Kampar Kiri Tengah. Wilayah ini sebagian besar berbatasan dengan Kota Pekanbaru dan merupakan kawasan dengan aktivitas transportasi dan permukiman yang lebih intensif. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh aktivitas antropogenik terhadap kualitas udara regional. Luas wilayah dengan pencemaran sedang adalah sekitar 455.366,33 hektar (44%)

Kelas tinggi (relatif lebih tercemar) terkonsentrasi kuat di wilayah Kampar Kiri Hulu (bagian selatan) dan Beberapa area lokal di Bangkinang Kota dan bagian barat daya kabupaten. Dominasi kelas tinggi di wilayah selatan menunjukkan adanya kombinasi parameter polutan yang relatif lebih besar dibanding wilayah lainnya. Pola ini konsisten dengan hasil sebelumnya yang

menunjukkan dinamika aerosol dan variasi musiman pada wilayah tersebut. Luas wilayah dengan pencemaran tinggi adalah sekitar 113.508,28 hektar (11 %).

Berdasarkan hasil pemodelan menunjukkan adanya variasi spasial kualitas udara di Kabupaten Kampar dengan kombinasi lima parameter polutan yang digunakan. Zonasi yang dihasilkan mampu menggambarkan perbedaan karakteristik kualitas udara antar wilayah dan menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut mengenai faktor-faktor yang memengaruhi distribusi kualitas udara pada wilayah penelitian.

Dibandingkan hasil clustering *K-Means*, klasifikasi menggunakan *Random Forest* menghasilkan batas kelas yang lebih konsisten dan mudah diinterpretasikan. Hal ini menunjukkan bahwa proses pembelajaran pada *Random Forest* mampu mengenali hubungan antarp parameter polutan sehingga menghasilkan zonasi kualitas udara yang lebih representatif dibandingkan hasil clustering awal.

4. PEMBAHASAN

4.1. Dinamika Musiman Kualitas Udara

Analisis tren bulanan menunjukkan bahwa parameter polutan di Kabupaten Kampar memiliki pola musiman yang berbeda. Konsentrasi NO_2 dan CO cenderung lebih tinggi pada awal tahun, sedangkan SO_2 dan O_3 mencapai nilai maksimum pada pertengahan tahun. Aerosol Index menunjukkan peningkatan pada periode Juli hingga Desember yang mengindikasikan meningkatnya keberadaan partikel aerosol di atmosfer.

Perbedaan pola antarp parameter menunjukkan bahwa kualitas udara tidak hanya dipengaruhi oleh sumber emisi, tetapi juga oleh faktor meteorologi seperti curah hujan, radiasi matahari, dan stabilitas atmosfer. Kondisi musim kemarau yang umumnya terjadi pada pertengahan hingga akhir tahun berpotensi meningkatkan konsentrasi aerosol dan memperpanjang waktu tinggal polutan di atmosfer. Sebaliknya, peningkatan curah hujan pada periode tertentu dapat mempercepat proses deposisi sehingga konsentrasi polutan cenderung menurun.

Pola musiman yang diperoleh pada penelitian ini sejalan dengan karakteristik iklim tropis Indonesia yang dipengaruhi pergantian musim hujan dan kemarau. Pada periode kemarau, peningkatan radiasi matahari serta berkurangnya proses deposisi basah menyebabkan beberapa polutan dan aerosol bertahan lebih lama di atmosfer. Sebaliknya, curah hujan yang tinggi berkontribusi terhadap proses pencucian atmosfer (*wet deposition*) sehingga konsentrasi polutan cenderung menurun.

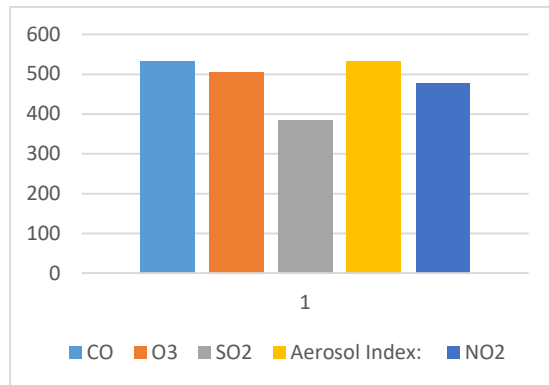
4.2. Hasil Analisis Feature Importance

Analisis kontribusi variabel dilakukan untuk mengetahui tingkat pengaruh masing-masing parameter polutan dalam proses klasifikasi kualitas udara menggunakan metode *Random Forest*. Nilai kontribusi diperoleh dari output *feature importance* pada model yang dibangun. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh parameter memberikan kontribusi terhadap pembentukan kelas kualitas udara, dengan tingkat pengaruh yang bervariasi. Tabel 4 merupakan tabel kontribusi terhadap pembentukan kelas kualitas

udara dalam model *random forest* dan Gambar 6 merupakan grafik perbedaan tingkat pengaruh kontribusi antar variabel.

Tabel 4 Kontribusi Variabel dalam Model *Random Forest*

No	Parameter	Nilai Importance
1	CO_column_number_density:	532.66400301555
2	O3_column_number_density:	504.81024064554
3	SO2_column_number_density:	384.08575017841
4	absorbing_aerosol_index:	532.16713142650
5	tropospheric_NO2_column_number_density:	476.54284503296



Gambar 6. Grafik Kontribusi Variabel

Parameter karbon monoksida (CO) memiliki nilai *feature importance* tertinggi sebesar 532,66, diikuti oleh *Aerosol Index* sebesar 532,17 dan ozon (O₃) sebesar 504,81. Sementara itu, nitrogen dioksida (NO₂) memiliki nilai kontribusi sebesar 476,54 dan sulfur dioksida (SO₂) menunjukkan nilai terendah yaitu 384,09. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi kualitas udara di Kabupaten Kampar selama tahun 2025 lebih banyak dipengaruhi oleh parameter yang berkaitan dengan aktivitas pembakaran dan keberadaan aerosol di atmosfer dibandingkan emisi sulfur.

Dominannya kontribusi CO dan *Aerosol Index* mengindikasikan bahwa sumber emisi yang berkaitan dengan pembakaran biomassa, kebakaran lahan, maupun aktivitas antropogenik lainnya memiliki peranan penting dalam membentuk pola kualitas udara di wilayah penelitian. Hal ini sejalan dengan kondisi Kabupaten Kampar yang pada tahun 2025 mengalami beberapa kejadian kebakaran hutan dan lahan pada sejumlah kecamatan. Aktivitas pembakaran diketahui menghasilkan emisi karbon monoksida dalam jumlah besar sekaligus meningkatkan konsentrasi partikel aerosol di atmosfer.

Di sisi lain, rendahnya kontribusi SO₂ menunjukkan bahwa sumber emisi sulfur tidak menjadi faktor dominan dalam menentukan kelas kualitas udara pada wilayah penelitian. Kondisi ini mengindikasikan bahwa aktivitas industri berat atau sumber emisi sulfur lainnya relatif terbatas dibandingkan sumber emisi yang menghasilkan CO dan aerosol. Dengan demikian, hasil *feature importance* menunjukkan bahwa parameter CO, *Aerosol Index*, dan O₃ merupakan variabel utama yang berperan dalam proses klasifikasi kualitas udara menggunakan *Random Forest* di Kabupaten Kampar tahun 2025.

Temuan ini memiliki kesesuaian dengan penelitian Anggraini dkk. [4] yang menunjukkan bahwa kombinasi beberapa parameter atmosfer memberikan representasi kualitas udara yang lebih baik dibandingkan penggunaan satu parameter saja. Namun demikian, penelitian ini memiliki perbedaan pada proses pembentukan kelas kualitas udara. Apabila penelitian sebelumnya memanfaatkan data pengamatan lapangan sebagai referensi, penelitian ini menggunakan pendekatan pseudo-label hasil clustering *K-Means* sehingga proses klasifikasi tetap dapat dilakukan pada wilayah dengan keterbatasan data kualitas udara berbasis pengukuran lapangan.

4.3. Hubungan dengan Kebakaran

Berdasarkan data dari berbagai sumber, tabel 5 berikut ini merupakan data kejadian kebakaran tahun 2025.

Tabel 5. Data Kejadian Kebakaran Tahun 2025.

Tanggal	Lokasi Kecamatan / Desa	Keterangan
Jan–Apr 2025	Kampar Kiri, Kuok, XIII Koto	±6 titik api, ±11,2 ha terbakar (Website Media Center Kabupaten Kampar)
~20 Jul 2025	Rimbo Panjang (Tambang)	Kebakaran lahan gambut, luas >100 ha pada Riau termasuk Kampar (ANTARA News)
9 Nov 2025	Tapung, Kampar Kiri, XIII Koto	6 hotspot satelit terdeteksi (Riau Pos - Informasi Terkini dari Riau)

Jika dibandingkan dengan hasil pemodelan *Random Forest*, wilayah yang termasuk kelas tinggi sebagian beririsan dengan kecamatan yang tercatat memiliki kejadian kebakaran tahun 2025, khususnya Kampar Kiri dan sekitarnya. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan kontribusi emisi kebakaran terhadap peningkatan parameter polutan atmosfer, terutama CO dan aerosol.

Peningkatan nilai *Aerosol Index* pada bulan Juli serta kembali meningkat pada November–Desember juga sejalan secara temporal dengan laporan kejadian kebakaran. Meskipun penelitian ini tidak melakukan analisis kausalitas langsung, kesesuaian spasial dan temporal tersebut mengindikasikan bahwa kejadian kebakaran berpotensi memengaruhi distribusi kualitas udara regional.

Klasifikasi *Random Forest* merepresentasikan kondisi relatif berdasarkan integrasi parameter satelit dan bukan hasil validasi langsung terhadap data lapangan. Oleh karena itu, hubungan dengan kejadian kebakaran diinterpretasikan sebagai faktor pendukung dalam menjelaskan pola spasial yang terbentuk.

Distribusi kelas kualitas udara menunjukkan bahwa meskipun sebagian besar wilayah (89%) berada pada kategori rendah dan sedang, terdapat 11% wilayah yang termasuk kelas tinggi dan terkonsentrasi secara spasial. Area ini dapat menjadi prioritas dalam pengawasan kualitas udara dan mitigasi kebakaran lahan.

Pendekatan berbasis satelit dan *Random Forest* dalam penelitian ini menunjukkan potensi sebagai alat pemantauan regional yang

efektif, terutama pada wilayah dengan keterbatasan stasiun pemantau kualitas udara darat. Integrasi multi-parameter atmosfer memungkinkan identifikasi zona risiko relatif secara lebih komprehensif dibanding analisis parameter tunggal.

4.4. Implikasi Metode Integrasi K-Means dan Random Forest

Integrasi metode *K-Means* dan *Random Forest* pada penelitian ini memberikan beberapa keuntungan dibandingkan penggunaan salah satu metode secara terpisah. *K-Means* mampu membentuk kelompok awal berdasarkan karakteristik alami data tanpa memerlukan label, sedangkan *Random Forest* meningkatkan konsistensi hasil klasifikasi melalui proses pembelajaran dari pseudo-label yang dihasilkan. Kombinasi kedua metode tersebut menghasilkan peta kualitas udara yang lebih mudah diinterpretasikan dibandingkan hasil clustering saja.

Selain menghasilkan zonasi spasial kualitas udara, model *Random Forest* juga mampu mengidentifikasi kontribusi masing-masing parameter melalui analisis *feature importance*. Informasi ini memberikan nilai tambah karena dapat digunakan untuk mengetahui parameter dominan yang memengaruhi kualitas udara pada wilayah penelitian. Pendekatan tersebut berpotensi diterapkan pada wilayah lain yang memiliki karakteristik serupa dan masih terbatas dalam penyediaan stasiun pemantau kualitas udara

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, data Sentinel-5P memiliki resolusi spasial sekitar 1 km sehingga belum mampu menggambarkan variasi kualitas udara pada skala lokal secara rinci. Kedua, proses klasifikasi menggunakan pseudo-label hasil *K-Means* belum divalidasi menggunakan data kualitas udara hasil pengukuran lapangan sehingga kelas yang dihasilkan bersifat relatif terhadap karakteristik data satelit. Ketiga, penelitian ini hanya menggunakan lima parameter atmosfer tanpa mempertimbangkan faktor meteorologi seperti arah angin, kelembapan udara, temperatur, maupun curah hujan yang berpotensi memengaruhi distribusi polutan

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil memetakan kualitas udara Kabupaten Kampar tahun 2025 menggunakan data Sentinel-5P melalui integrasi metode *K-Means* dan *Random Forest*. Hasil analisis menunjukkan bahwa parameter NO₂, CO, SO₂, O₃, dan Aerosol Index memiliki pola sebaran spasial dan temporal yang berbeda sepanjang tahun pengamatan. NO₂ dan CO cenderung menunjukkan fluktuasi moderat, sedangkan O₃ dan Aerosol Index memperlihatkan dinamika musiman yang lebih jelas terutama pada pertengahan hingga akhir tahun.

Penerapan *K-Means* menghasilkan tiga kelompok kualitas udara yang kemudian digunakan sebagai pseudo-label pada proses klasifikasi *Random Forest*. Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa sekitar 45% wilayah Kabupaten Kampar termasuk dalam kelas kualitas udara rendah, 44% kelas sedang, dan 11% kelas tinggi. Wilayah dengan kualitas udara tinggi terkonsentrasi pada bagian selatan Kabupaten Kampar, terutama Kecamatan Kampar Kiri Hulu dan sekitarnya.

Analisis *feature importance* menunjukkan bahwa CO dan Aerosol Index merupakan parameter yang memiliki kontribusi terbesar dalam pembentukan kelas kualitas udara, diikuti oleh O₃, NO₂, dan SO₂. Selain itu, distribusi spasial kelas kualitas udara tinggi menunjukkan kesesuaian dengan beberapa lokasi kejadian kebakaran hutan dan lahan yang terjadi selama tahun 2025. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi *K-Means* dan *Random Forest* berbasis data Sentinel-5P dapat digunakan sebagai alternatif pemetaan kualitas udara pada wilayah yang memiliki keterbatasan stasiun pemantau kualitas udara berbasis darat.

Pendekatan yang dikembangkan pada penelitian ini berpotensi menjadi alternatif sistem pemantauan kualitas udara berbasis satelit pada wilayah yang memiliki keterbatasan stasiun pemantau, sekaligus dapat mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan lingkungan dan mitigasi kebakaran hutan dan lahan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Kampar yang telah memberikan dukungan pendanaan melalui Program Hibah Penelitian Internal Tahun 2025.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. J. Hilly *et al.*, "Review of scientific research on air quality and environmental health risk and impact for PICTS," *Science of The Total Environment*, vol. 942, p. 173628, Sep. 2024, doi: [10.1016/j.scitotenv.2024.173628](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173628).
- [2] E. Nur, B. A. Seno, and R. Hidayanti, "Risiko Gangguan Kesehatan Masyarakat Akibat Pajanan PM10 di Kota Padang," *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, vol. 20, no. 2, pp. 97–103, Oct. 2021, doi: [10.14710/jkli.20.2.97-103](https://doi.org/10.14710/jkli.20.2.97-103).
- [3] K. Kusmiyati, N. T. Kambuno, P. Selasa, and F. W. F. Waangsir, "Pengaruh Paparan Pencemar Udara Terhadap Stres Oksidatif: Sistematis Review," *J. Ilmu Lingk.*, vol. 20, no. 3, pp. 628–636, Jul. 2022, doi: [10.14710/jil.20.3.628-636](https://doi.org/10.14710/jil.20.3.628-636).
- [4] Fo. Abulude, Ia. Abulude, Sd. Oluwagbayide, Sd. Afolayan, and D. Ishaku, "Air Quality Index: a Case of 1-Day Monitoring in 253 Nigerian Urban and Suburban Towns," *J geovis spat anal*, vol. 6, no. 1, p. 5, Jun. 2022, doi: [10.1007/s41651-022-00100-6](https://doi.org/10.1007/s41651-022-00100-6).
- [5] K. Ashraf, Y. M. Park, M. H. E. M. Browning, J. Wang, R. Wang, and K. Lee, "Examining the joint effect of air pollution and green spaces on stress levels in South Korea: using machine learning techniques," *International Journal of Digital Earth*, vol. 17, no. 1, p. 2372321, Dec. 2024, doi: [10.1080/17538947.2024.2372321](https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2372321).
- [6] M. Amin *et al.*, "A review of particulate matter (PM) in Indonesia: trends, health impact, challenges, and options," *Environ Monit Assess*, vol. 197, no. 1, p. 11, Dec. 2024, doi: [10.1007/s10661-024-13426-z](https://doi.org/10.1007/s10661-024-13426-z).
- [7] T. S. Anggraini, H. Irie, A. D. Sakti, and K. Wikantika, "Machine learning-based global air quality index development using remote sensing and ground-based stations," *Environmental Advances*, vol. 15, p. 100456, Apr. 2024, doi: [10.1016/j.envadv.2023.100456](https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100456).
- [8] Z. Mushtaq *et al.*, "Satellite or ground-based measurements for air pollutants (PM2.5, PM10, SO2, NO2, O3) data and their health hazards: which is most

- accurate and why?,” *Environ Monit Assess*, vol. 196, no. 4, p. 342, Apr. 2024, doi: [10.1007/s10661-024-12462-z](https://doi.org/10.1007/s10661-024-12462-z).
- [9] C. Vigouroux *et al.*, “TROPOMI–Sentinel-5 Precursor formaldehyde validation using an extensive network of ground-based Fourier-transform infrared stations,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 13, no. 7, pp. 3751–3767, Jul. 2020, doi: [10.5194/amt-13-3751-2020](https://doi.org/10.5194/amt-13-3751-2020).
- [10] N. Das, A. Katyal, P. Dutta, P. Aggarwal, P. P.S., and K. Vincent, “Sensor Networks for Real-Time Air Quality Monitoring in Smart Cities,” in *2025 International Conference on Automation and Computation (AUTOCOM)*, Dehradun, India: IEEE, Mar. 2025, pp. 421–425. doi: [10.1109/AUTOCOM64127.2025.10957338](https://doi.org/10.1109/AUTOCOM64127.2025.10957338).
- [11] S. Du, H. Wei, D. Y. Lee, Z. Hu, and S. Pan, “Graph-Based Physics-Guided Urban PM_{2.5} Air Quality Imputation with Constrained Monitoring Data,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, p. 3734869, May 2025, doi: [10.1145/3734869](https://doi.org/10.1145/3734869).
- [12] M. Santoso *et al.*, “Assessment of Urban Air Quality in Indonesia,” *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 20, pp. 2142–2158, 2020, doi: [10.4209/aaqr.2019.09.0451](https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.09.0451).
- [13] A. S. Mihăiță, L. Dupont, O. Chery, M. Camargo, and C. Cai, “Evaluating air quality by combining stationary, smart mobile pollution monitoring and data-driven modelling,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 221, pp. 398–418, Jun. 2019, doi: [10.1016/j.jclepro.2019.02.179](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.179).
- [14] J. Hofman *et al.*, “Air Quality Sensor Networks for Evidence-Based Policy Making: Best Practices for Actionable Insights,” *Atmosphere*, vol. 13, no. 6, p. 944, Jun. 2022, doi: [10.3390/atmos13060944](https://doi.org/10.3390/atmos13060944).
- [15] A. M. Graham *et al.*, “Updated Smoke Exposure Estimate for Indonesian Peatland Fires Using a Network of Low-Cost PM_{2.5} Sensors and a Regional Air Quality Model,” *GeoHealth*, vol. 8, no. 11, p. e2024GH001125, Nov. 2024, doi: [10.1029/2024GH001125](https://doi.org/10.1029/2024GH001125).
- [16] European Space Agency, “TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide,” 2021, doi: [10.5270/SSP-9bnp8q8](https://doi.org/10.5270/SSP-9bnp8q8).
- [17] P. T. Grzybowski, K. M. Markowicz, and J. P. Musiał, “Estimations of the Ground-Level NO₂ Concentrations Based on the Sentinel-5P NO₂ Tropospheric Column Number Density Product,” *Remote Sensing*, vol. 15, no. 2, p. 378, Jan. 2023, doi: [10.3390/rs15020378](https://doi.org/10.3390/rs15020378).
- [18] E. J. Kim *et al.*, “A Comparison of Regression Methods for Inferring Near-Surface NO₂ With Satellite Data,” *JGR Atmospheres*, vol. 129, no. 16, p. e2024JD040906, Aug. 2024, doi: [10.1029/2024JD040906](https://doi.org/10.1029/2024JD040906).
- [19] R. G. Atallah, N. S. Hasanah, F. Azna, D. A. Sopiana, A. Nurcahya, and T. S. Anggraini, “Analisis Pengaruh Angin Muson Terhadap Distribusi PM_{2.5} Dan Implikasinya Pada Penyebaran Penyakit,” *Geography*, vol. 14, no. 1, p. 139, Apr. 2026, doi: [10.31764/geography.v14i1.37406](https://doi.org/10.31764/geography.v14i1.37406).
- [20] Moh. Dede *et al.*, “Estimasi Perubahan Kualitas Udara Berbasis Citra Satelit Penginderaan Jauh Di Sekitar PLTU Cirebon,” *Jambura Geosci. Rev.*, vol. 2, no. 2, pp. 78–87, Jun. 2020, doi: [10.34312/jgeosrev.v2i2.5951](https://doi.org/10.34312/jgeosrev.v2i2.5951).
- [21] I Gusti Ayu Nandia Lestari and I Komang Agus Ady Aryanto, “Peningkatan Akurasi Klasifikasi Kualitas Udara melalui Oversampling dengan Metode Support Vector Machine dan Random Forest,” *JSI*, vol. 18, no. 1, pp. 1–9, Nov. 2023, doi: [10.30864/jsi.v18i1.596](https://doi.org/10.30864/jsi.v18i1.596).
- [22] E. Mustika Sari, C. Sabila, R. Fakhri Adam, and R. Kurniawan, “Analisis dan Prediksi Indeks Kualitas Udara Jakarta: Penerapan Algoritma XGBoost,” *TEKNOSI*, vol. 11, no. 2, pp. 161–169, Sep. 2025, doi: [10.25077/TEKNOSI.v11i2.2025.161-169](https://doi.org/10.25077/TEKNOSI.v11i2.2025.161-169).
- [23] F. Akbar, Rafiqah, and D. W. S. Nirad, “Implementasi Dashboard Pasien Rawat Jalan Rumah Sakit Umum XYZ dengan Fitur Clustering, Forecasting dan Outlier Detection,” *TEKNOSI*, vol. 11, no. 2, pp. 170–177, Sep. 2025, doi: [10.25077/TEKNOSI.v11i2.2025.170-177](https://doi.org/10.25077/TEKNOSI.v11i2.2025.170-177).
- [24] A. Firmansyah, M. F. Syahidin, and Y. S. Triana, “Prediksi Kebakaran Hutan Berdasarkan Titik Panas dan Iklim Menggunakan Algoritma Random Forest,” *TEKNOSI*, vol. 10, no. 2, pp. 145–155, Sep. 2024, doi: [10.25077/TEKNOSI.v10i2.2024.145-155](https://doi.org/10.25077/TEKNOSI.v10i2.2024.145-155).
- [25] Google Earth Engine, “Sentinel-5P Data Catalog.” Jan. 2026. [Online]. Available: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-5p?>

BIODATA PENULIS

Penulis Pertama



Muhammad Ridwan merupakan dosen aktif pada Program Studi Teknik Informatika, Politeknik Kampar, Bangkinang, Riau, sejak tahun 2008. Memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) Jurusan Teknik Elektro (Teknik Kendali) Universitas Indonesia tahun 2015 dan Sarjana Teknik (S.T.) Jurusan Teknik Elektro dari Universitas Andalas tahun 2007. Saat ini sedang melanjutkan pendidikan doktoral Universitas Negeri Padang Ilmu Lingkungan. Penulis menekuni bidang penelitian pada pengembangan machine learning GIS dan Internet of Things (IoT). penulis dapat dihubungi melalui email: ridwanpolkam@gmail.com

Penulis Kedua



Fenty Kurnia Oktorina Dosen Prodi Teknik Informatika Politeknik Kampar. Lahir di Pekanbaru tanggal 31 Oktober 1978. Penulis merupakan dosen tetap di program studi Teknik Informatika Politeknik kampar sejak tahun 2008. Menyelesaikan pendidikan S1 pada program studi Teknik Informatika STMIK Jabar dan S2 Advanced Computer – Glasgow Caledonian University UK. Saat ini sedang melanjutkan pendidikan Doktoral di Universitas Negeri Padang. Penulis menekuni bidang kajian Environmental Informatics dengan fokus Spatial Decision Support System (SDSS) untuk masalah lingkungan. Beberapa publikasi telah diterbitkan baik di tingkat nasional ter-indeks dan bereputasi. Kontak email korespondensi: fkoktorina@gmail.com

Penulis Ketiga



Hanifah Khairiah, S.ST., M.T. merupakan Dosen Prodi Teknik Pengolahan Sawit Politeknik Kampar. Penulis menyelesaikan Magister Teknik Lingkungan di Universitas Indonesia dan sedang melanjutkan pendidikan Doktoral Teknik Lingkungan di Institut Teknologi Bandung (ITB). Bidang keahlian yang ditekuni meliputi pengolahan limbah, *waste to energy*, bioenergi, bioetanol, serta pemanfaatan limbah kelapa sawit. Dalam lima tahun terakhir, penulis aktif melakukan penelitian terkait *waste to energy* dari limbah kelapa sawit maupun minyak goreng bekas, pemurnian minyak goreng bekas, bioremediasi limbah cair CPO, dan bioetanol generasi II dari tandan kosong kelapa sawit. Beberapa publikasinya telah diterbitkan pada jurnal nasional, antara lain Jurnal Pangan dan

Agroindustri, Jurnal Teknik Pengolahan Pertanian, Jurnal Sains dan Ilmu Terapan, JUTIN: Jurnal Teknik Industri Terintegrasi, , dan Jurnal Sawit Indonesia. Penulis juga menghasilkan produk riset berupa buku *Analisis Mutu Produk Turunan Kelapa Sawit* dan *Dasar Kerja Laboratorium* pada tahun 2025. Kontak email korespondensi: hanifahkhairiah@gmail.com